

研究 IIB 矩阵模型中 $SO(10)$ 对称性自发破缺

Arpith Kumar^{1*†}, Anosh Joseph^{1,2}, and Piyush Kumar¹

¹Department of Physical Sciences, Indian Institute of Science Education and Research (IISER) Mohali, Knowledge City, Sector 81, SAS Nagar, Punjab 140306, India

²National Institute for Theoretical and Computational Sciences, School of Physics and Mandelstam Institute for Theoretical Physics, University of the Witwatersrand, Johannesburg, Wits 2050, South Africa

*arpithk.phy@gmail.com

[†]Contribution to the proceedings of the XXV DAE-BRNS HEP Symposium 2022, 12-16 December 2022, IISER Mohali, India.

摘要

非微扰表述对于理解超弦理论中额外维度的动态紧致化至关重要。在大 N 极限下的 II 型 B (IKKT) 矩阵模型是为十维 II 型 B 超弦提出的一种此类表述。在此模型中, 预计光滑时空流形将从十个玻色子矩阵的本征值中浮现出来。当这种情况发生时, 欧几里得签名中的 $SO(10)$ 对称性必须自发破缺。由于在积分掉费米子后得到的 Pfaffian 本质上是复数, 因此欧式版本存在严重的符号问题。近年来, 复朗之万方法 (CLM) 成功解决了符号问题。我们将 CLM 方法应用于 II 型 B 矩阵模型的欧几里得版本, 并研究自发 $SO(10)$ 对称性破缺的可能性。在此过程中, 我们遇到了奇异漂移问题。为了解决这个问题, 我们引入了带有 Myers 项的保超对称变形。我们在消失变形参数极限下研究原始模型中的自发对称性破缺。我们的分析表明, Pfaffian 的相位诱导了欧几里得 II 型 B 模型中自发 $SO(10)$ 对称性破缺。

1 欧几里得类型 IIB 矩阵模型

欧几里得 IKKT 矩阵模型 [1] 的配分函数，其作用量为

$$S_{\text{IKKT}} = S_{\text{b}} + S_{\text{f}} \quad (1)$$

，由

$$Z = \int dX d\psi \exp(-S_{\text{IKKT}}) = \int dX \text{Pf} \mathcal{M} \exp(-S_{\text{b}}), \quad (2)$$

给出，其中玻色子和费米子的作用量分别为

$$S_{\text{b}} = -\frac{1}{4} N \text{tr} ([X_{\mu}, X_{\nu}]^2) \quad (3)$$

和

$$S_{\text{f}} = -\frac{1}{2} N \text{tr} (\psi_{\alpha} (\mathcal{C} \Gamma^{\mu})_{\alpha\beta} [X_{\mu}, \psi_{\beta}]). \quad (4)$$

。费米子算符 $\mathcal{M}$ 的元素是

$$\mathcal{M}_{\alpha a, \beta b} = \frac{N}{2} \Gamma_{\alpha\beta}^{\mu} \text{tr} (X_{\mu} [t^a, t^b]). \quad (5)$$

$N \times N$ 迹为零的厄米矩阵 X_{μ} 和 Majorana-Weyl 自旋子 ψ_{α} 分别在 $\text{SO}(10)$ 对称性下作为矢量和自旋子变换。我们有 10D 中 gamma 矩阵 Γ_{μ} 的 Weyl 投影表示。划分函数在积分掉费米子后涉及 $\mathcal{M}$ ，这是一个大小为 $16(N^2 - 1) \times 16(N^2 - 1)$ 的复数反对称矩阵，用 $\text{SU}(N)$ 的 $N^2 - 1$ 生成器 $\{t^a\}$ 表示。最近的研究 [2–4] 强调了行列式复杂相位在 $\text{SO}(10)$ 对称性自发破缺 (SSB) 中的关键作用。其剧烈波动表明存在严重的符号问题，使得相位淬火近似不准确。复 Langevin 方法 [5, 6] 是其中最前景的方法之一，但在应用于欧几里得 IKKT 模型时会遇到单奇异漂移问题的障碍。在最近的一些启发性研究中，提出通过质量变形来避免这个问题 [7–9]。在这项工作中，我们建议使用保超对称性 (SUSY) 的变形将 $\mathcal{M}$ 的特征值移离原点。

2 超对称保持的质量变形

我们引入了一个保持超对称性的形变到 IKKT 模型的行动 [10]。变形作用为

$$S = S_{\text{IKKT}} + S_{\Omega}, \quad (6)$$

其中

$$S = N \operatorname{tr} \left(M^{\mu\nu} X_\mu X_\nu + i N^{\mu\nu\sigma} X_\mu [X_\nu, X_\sigma] + \frac{i}{8} \bar{\psi} N_3 \psi \right), \quad (7)$$

$$N_3 = -\Omega \Gamma^8 \Gamma^{9\dagger} \Gamma^{10}, \quad (8)$$

$$N^{\mu\nu\sigma} = \frac{\Omega}{3!} \sum_{\mu, \nu, \sigma=8}^{10} \epsilon^{\mu\nu\sigma} \quad (9)$$

和

$$M = \frac{\Omega^2}{4^3} (\mathbb{I}_7 \oplus 3\mathbb{I}_3). \quad (10)$$

在上述内容中, $\epsilon^{\mu\nu\sigma}$ 是一个完全反对称的 3 形式, $M^{\mu\nu}$ 是质量矩阵, Ω 是变形参数。IKKT 矩阵模型对应于 $\Omega \rightarrow 0$ 极限。

我们的初步模拟结果如图 1 所示。在上图中, 我们可以看到奇异漂移问题对于 $\Omega = 0$ 是明显的, 但随着 Ω 的增加, 这个问题被成功避免了。在下图中, 我们展示了阶参数 $\langle \rho_\mu(\Omega) \rangle$ 相对于 Ω 的行为。一个自发的 $\text{SO}(10) \rightarrow \text{SO}(7) \times \text{SO}(3)$ 破缺现象即使对于 $N = 6$ 也是明显的。如同 $\Omega \rightarrow 0$, $\text{SO}(7)$ 对称性进一步分解为更小的子群, 暗示了一个具有 $d < 7$ 的 $\text{SO}(d)$ 对称真空。

3 结论与未来展望

我们使用复朗之万方法对欧几里得类型 IIB 矩阵模型进行了从头算研究。奇异漂移问题通过保 SUSY 变形得到了解决。我们的研究表明, Pfaffian 相位触发了 $\text{SO}(10)$ 对称性的自发破缺。这项工作的全面分析不久将在其他地方发表。(参见 [11] 以获取关于此项正在进行的工作的最新更新。) 我们认为, 为了理解该理论真空结构的确切性质, 需要进行大规模的 N 外推。

4 致谢

AK 部分得到了 IISER Mohali 和印度政府科学与工业研究委员会 (CSIR) 的研究基金 (编号: 09/ 947(0112)/2019-EMR-I) 的支持。AJ 的工作部分得到了 IISER Mohali 和威特沃特斯兰德大学的支持。PK 部分得到了印度政府科技部提供的 INSPIRE 高等教育奖学金的支持。我们感谢国家超级计算任务 (NSM), 通过位于 NABI Mohali 的 PARAM Smriti 超级计算机系统提供了计算资源。

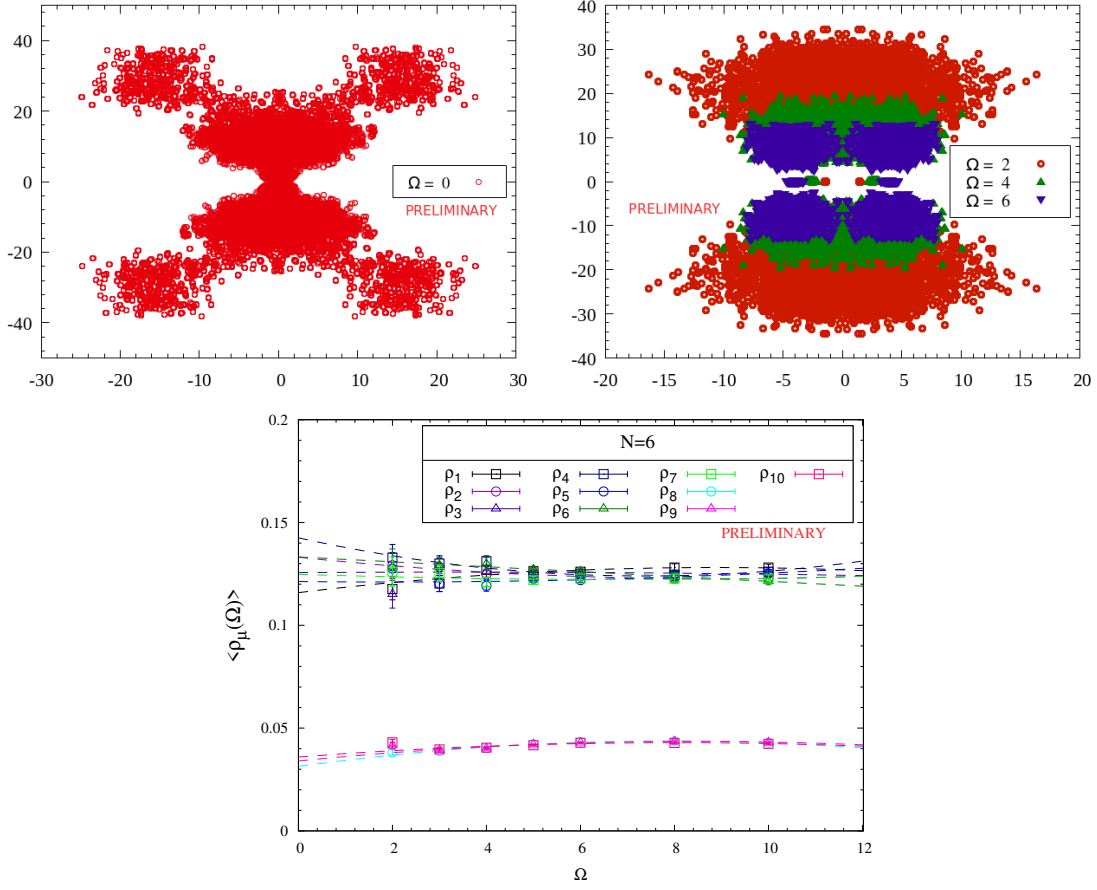


图 1: (上) 费米子算子特征值的散点图, 针对不同的 Ω 。(下) ρ_μ 相对于 Ω 的行为。所有的模拟都是在 $N = 6$ 条件下进行的。这些图表取自参考文献 [11]。

References

1. Ishibashi N, Kawai H, Kitazawa Y, and Tsuchiya A. A Large N reduced model as superstring. Nucl. Phys. B 1997;498:467–91.
2. Krauth W, Nicolai H, and Staudacher M. Monte Carlo approach to M theory. Phys. Lett. B 1998;431:31–41.
3. Ambjorn J, Anagnostopoulos KN, Bietenholz W, Hotta T, and Nishimura J. Monte Carlo studies of the IIB matrix model at large N . JHEP 2000;07:011.
4. Nishimura J, Okubo T, and Sugino F. Systematic study of the $SO(10)$ symmetry breaking vacua in the matrix model for type IIB superstrings. JHEP 2011;10:135.
5. Parisi G. On complex probabilities. Phys. Lett. B 1983;131:393–5.

6. Klauder JR. Stochastic quantization. *Acta Phys. Austriaca Suppl.* 1983;25. Ed. by Mitter H and Lang CB:251–81.
7. Ito Y and Nishimura J. The complex Langevin analysis of spontaneous symmetry breaking induced by complex fermion determinant. *JHEP* 2016;12:009.
8. Anagnostopoulos KN, Azuma T, Ito Y, Nishimura J, and Papadoudis SK. Complex Langevin analysis of the spontaneous symmetry breaking in dimensionally reduced super Yang-Mills models. *JHEP* 2018;02:151.
9. Anagnostopoulos KN, Azuma T, Ito Y, Nishimura J, Okubo T, and Kovalkov Papadoudis S. Complex Langevin analysis of the spontaneous breaking of 10D rotational symmetry in the Euclidean IKKT matrix model. *JHEP* 2020;06:069.
10. Bonelli G. Matrix strings in pp wave backgrounds from deformed superYang-Mills theory. *JHEP* 2002;08:022.
11. Kumar A, Joseph A, and Kumar P. Complex Langevin Study of Spontaneous Symmetry Breaking in IKKT Matrix Model. *PoS* 2023;LATTICE2022:213.